


**مهندسی متالورژی و مواد**

https://jmme.um.ac.ir





# بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلیاژ Cu-5Zn تقویت شده با نانولوله‌های کربنی *

مقاله پژوهشی

محمد علی پور[۱]

*DOI: 10.22067/jmme.2023.82283.1108*

**چکیده** *بعد از کشف نانولوله‌های کربنی مشاهدات نشان داد که نانولوله‌های کربنی دارای خواص چند منظوره بوده و به عنوان یک ماده تقویت کننده برای نانوکامپوزیت‌های فلزی می‌توان از آنها استفاده کرد. در این تحقیق، نانولوله‌های کربنی چند جداره به عنوان تقویت کننده نانوکامپوزیت با زمینه آلیاژ Cu-5Zn استفاده شده است. نانولوله‌های کربنی در درصدهای ۱ - ۰/۲۵ به نانوکامپوزیت اضافه شد. برای پراکندگی خوب نانولوله‌های کربنی در زمینه، از امواج آلتراسونیک استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت از پرس و فرایند تف‌جوشی استفاده شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی مانند میکروسختی و استحکام کششی نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزودن نانولوله‌های کربنی خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. مکانیزم پیشنهادی برای افزایش استحکام در نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی مکانیزم پل‌زنی می‌باشد. میکروسختی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش نانولوله‌های کربنی تا ۰/۷۵ درصد، به صورت خطی افزایش یافته و میزان افزایش سختی نانوکامپوزیت با فاز تقویت کننده نانولوله کربنی، ۳۶ درصد بیشتر از آلیاژ پایه مس-روی به دست آمده است. استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های مس با افزایش میزان تقویت کننده نانولوله‌های کربنی، ۲۸۹ MPa به دست آمده که در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی با استحکام ۱۶۵ MPa افزایش چشم‌گیری داشته است.*

**واژه‌های کلیدی** نانولوله‌های کربنی، مس، متالورژی پودر، خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت.

# Investigating the Microstructure and Mechanical Properties of Cu-5Zn Alloy Nanocomposite Reinforced with Carbon Nanotubes

Mohammad Alipour

**Abstract** After the discovery of carbon nanotubes, observations showed that carbon nanotubes have multi-purpose properties and can be used as a reinforcing material for metal nanocomposites. In this research, multi-walled carbon nanotubes have been used as nanocomposite reinforcement with Cu-5Zn alloy base. Carbon nanotubes were added to the nanocomposite in percentages of 0.25-1. Ultrasonic waves were used for good dispersion of carbon nanotubes in the field. Pressing and sintering processes were used to make nanocomposite samples. The microstructure was studied using a scanning electron microscope. The effect of carbon nanotubes on mechanical properties such as microhardness and tensile strength of nanocomposite was investigated. The results showed that the mechanical properties are improved by adding carbon nanotubes. The proposed mechanism for increasing the strength in nanocomposites reinforced with carbon nanotubes is the bridging mechanism. The microhardness of nanocomposites increases linearly with the increase of carbon nanotubes up to 0.75%, and the increase in hardness of nanocomposite with carbon nanotube reinforcing phase is 36% more than copper-zinc base alloy. The tensile strength of copper nanocomposites is 289 MPa by increasing the amount of carbon nanotube reinforcement, which is a significant increase compared to the base copper-zinc alloy with a strength of 165 MPa.

**Keywords** *Carbon Nanotubes, Copper, Powder Metallurgy, Mechanical Properties, Nanocomposites.*

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۲۵ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

**Email**: alipourmo@tabrizu.ac.ir

## مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی از جمله مهم‌ترین انواع مواد پیشرفته می‌باشند که قدمتی بیش از ۵۰ سال دارند. این نوع کامپوزیت‌ها در صنایع زیادی همانند صنایع نظامی، حمل و نقل، هواپیماسازی و خطوط انتقال قدرت مورد استفاده می‌باشند[1-3]. از جمله کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه مسی هستند که به دلیل مزایایی از قبیل دانسیته پایین، استحکام ویژه بالا، مقاومت به سایش عالی و مقاومت به خستگی و خوردگی مناسب، امروزه در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا و خودرو دارای کاربرد گسترده‌ای هستند[3-6].

اضافه کردن عوامل تقویت کننده سرامیکی به آلیاژهای مسی موجب افزایش خواص مکانیکی و سایشی آنها می‌شود. عمده ذرات تقویت کننده که به آلیاژهای پودری آلیاژی مس اضافه می‌شوند، کاربیدها، بوریدها، اکسیدها و نیتریدها می‌باشند. کاربید سیلیسیم با دمای ذوب بالا، چگالی پایین، استحکام بالا، سختی بالا، مقاومت به شوک حرارتی عالی، انبساط حرارتی پایین، هدایت حرارتی بالا و مدول الاستیک زیاد، یک تقویت کننده مناسب برای کاربردهای دمای بالا به شمار می‌رود[4-6].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه‌های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب هم‌زمان، آلیاژسازی مکانیکی و روش‌های گوناگون ریخته‌گری نظیر ریخته‌گری کوبشی، ریخته‌گری نیمه جامد، ریخته‌گری گردابی و دیگر روش‌ها تولید می‌شوند [3,7] . روش ریخته‌گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می‌باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می‌شود، سپس با روش‌های متداول، ریخته‌گری انجام می‌گیرد[7].

لازم به ذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلیاژی مس نرم همواره منجر به بهبود خواص نمی‌شود. حضور فیلم‌های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت‌های تهیه شده از روش ریخته‌گری گردابی به دلایل مختلف از جمله کشیده شدن هوا به داخل مذاب در حین هم زدن دوغاب کامپوزیتی و ممانعت از خروج گازها از دوغاب پس از ریخته‌گری به دلیل گران‌روی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می‌تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت‌های زمینه فلزی ذره‌ای، عموما توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم‌های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می‌شود [7].

کشف نانولوله‌های کربنی (CNTs)، عصر جدیدی را در زمینه علوم مواد و فناوری نانو ایجاد کرده است. پیوند کوانتومی کربن–کربن در ورقه گرافن قوی‌ترین پیوند شناخته شده در طبیعت است. از زمان کشف نانولوله‌های کربنی مطالعات زیادی در ارزیابی خواص مکانیکی آنها انجام شده است. از تکنیک‌های موجود، تخلیه قوس الکتریکی بیشترین روش برای تولید نانولوله‌های کربنی با خلوص بالا است [4-5]. همچنین مطالعات تئوری و تجربی زیادی به منظور تعیین خواص مکانیکی نانولوله‌های کربن انجام گرفته است [6-7]. مدول الاستیک محوری نانولوله‌های کربنی قابل مقایسه با مدول الاستیسیته درطول سطح ورقه گرافیت است. برای اولین بار مدول یانگ برای نانولوله کربن توسط Overney و همکاران پیش‌بینی شد[8] . Lu و همکاران [9] مطالعه کامل نظری خواص مکانیکی CNTsهای تک و چند جداره را با استفاده از دینامیک ملکولی انجام دادند. مدول یانگ برای نانولوله کربنی تک جداره 1 Tpa به دست آمد. مبنای فیزیکی این آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل نوسانات حرارتی نانولوله‌های کربنی در دماهای مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) است، خواص مکانیکی و حرارتی و الکتریکی CNTs از لحاظ تئوری و تجربی به اثبات رسیده است [10]با ترکیب CNTs به زمینه‌های مناسب، نانوکامپوزیت‌هایی با خصوصیاتی همچون وزن کم، افزایش استحکام و سختی و هدایت الکتریکی به دست آمده است. نانوکامپوزیت‌هایی که با زمینه فلزی می‌باشند و توسط نانولوله‌های کربنی تقویت شده‌اند به علت وزن کم (سبک بودن) استحکام کششی زیاد، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. با توجه به مشکلاتی که حاصل از اصطکاک و استهلاک زودرس قطعات و هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها در صنعت حمل‌ونقل وجود دارد، باید از مواد روانکار با کیفیت بالا در شرایط سخت فشار و دمای بالا استفاده نمود. در چنین مواردی نانولوله‌های کربنی به علت دارا بودن خاصیت روانکاری و ضدسایشی می‌تواند به عنوان روان کننده‌های بالقوه حائز اهمیت باشد [11-14]. آلیاژهای آلومینیوم و

مس از محبوب‌ترین و شناخته شده‌ترین زمینه غیر آهنی برای کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی شناخته شده‌اند. در اغلب مطالعات برای ساخت نانوکامپوزیت Cu/CNTs از روش متالورژی پودر استفاده شده است [15-17]. George و همکارانش [18] کامپوزیت Al/CNTs را با استفاده از روش اکستروژن گرم تهیه نمودند. زمان آسیاکاری کوتاه برای جلوگیری از هیچ گونه آسیبی به نانولوله‌های کربنی انتخاب شده و نتایج نشان داد که با افزایش مقادیر استحکام و مدول یانگ برای کامپوزیت‌های Al/CNTs افزایش یافته است. Ram و همکاران [19] نانوکامپوزیت‌های AA6061/MWCNTs بوسیله پرس داغ آماده نمودند و بررسی‌هایی بر روی آنها انجام دادند. Kashyap و همکارانش [20] رفتار پیرسختی نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) که به عنوان تقویت کننده نانو کامپوزیت AA6063 به کار رفته است را بررسی کردند. در پژوهش دیگر Tu و همکاران [21] کامپوزیت‌های Cu/CNTs را که در آن میزان درصد نانولوله‌های کربنی در محدوده ۱۶–۰ ٪ است، با روش متالوژی پودر تهیه کردند. Kimetal و همکاران [22] کامپوزیت‌های Cu/CNTs را به وسیله روش تف‌جوشی با پلاسمای جرقه‌ای و به دنبال آن با روش لوله‌ای کردن سرد (cold rolling process) سنتز کردند. در این فرایند پودرهای مس با فرایند اسپری خشک واحیا شدن تولید می‌شوند. پودر مس و نانولوله‌های کربن در آسیاهای گلوله‌ای با انرژی بالا مخلوط شده و با استفاده از سیستم تف‌جوشی به روش پلاسما (sps)، فشرده‌سازی شدند. در تحقیق حاضر بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلیاژ Cu-5Zn تقویت شده با نانولوله‌های کربنی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در رابطه با رفتار خوردگی و سایشی نانوکامپوزیت‌های زمینه مسی نیز تحقیقات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد با افزودن نانوذرات مختلف خواص خوردگی و سایشی زمینه بهبود می‌یابد [23-26].

## روش تحقیق

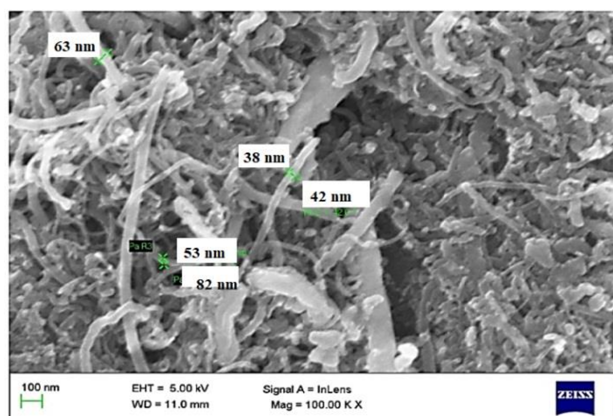
***مواد و روش‌ها.*** این تحقیق از نانولوله‌های کربنی چند دیواره تولید شرکت یواس نانو استفاده شده است. مشخصات نانولوله‌های کربنی عبارتند از: طول ۱۰–۱ میکرومتر، قطر بیرونی ۳۰–۵۰ نانومتر، قطر داخلی ۱۰–۵ نانومتر و دارای درصد خلوص بالاتر از ٪۹۵. با در نظر گرفتن کاربردهای زیاد آلیاژهای مس، آلیاژ Cu-5Zn به عنوان زمینه مناسبی برای سنتز کامپوزیت¬ها در نظر گرفته شد. پودر آلیاژی Cu-5Zn با چگالی حدود ۸/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و اندازه ذرات حدود ۱۰–۲ میکرومتر با خلوص بیشتر از ٪ ۹۹/۵ می‌باشد. این پودر از شرکت گانژو چین خریداری شده است. ابتدا نانولوله‌های کربنی در ۵۰۰ میلی‌لیتر اتانول پخش شد. برای پخش هموژن نانولوله‌های کربنی از امواج آلتراسونیک استفاده شد. بعد از افزودن پودر آلیاژی Cu-5Zn به داخل محلول اتانول حاوی نانولوله‌های کربنی، به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد و سپس اعمال امواج آلتراسونیک متوقف شد و محلول پودر نانوکامپوزیت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک گردید. پودر آلیاژی Cu-5Zn و نانولوله‌های کربنی با درصد وزنی متفاوت (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵و ۱) با استفاده از امواج آلتراسونیک و آسیای گلوله‌ای ترکیب شدند. برای مخلوط کردن از آسیای گلوله‌ای که شامل گلوله‌های ضد زنگ ۳۰۴ می‌باشد استفاده شد. زمان لازم برای مخلوط کردن نانوکامپوزیت توسط آسیای گلوله‌ای ۶۰ دقیقه انتخاب شد. علت انتخاب این زمان کوتاه برای جلوگیری از آسیب رسیدن به ساختار نانولوله‌های کربنی می‌باشد. فرایند ترکیب در مدت زمان ۶۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه انجام شدکه در هر ۱۵ دقیقه آسیا به مدت ۵ دقیقه متوقف شد. این کار از افزایش دمای پودرها تحت فرایند آسیاب شدن جهت جلوگیری از جوش ذرات انجام شد. محیط داخل آسیاب گلوله‌ای توسط گاز خنثای آرگون پر شد تا از اکسید شدن پودرها جلوگیری به عمل بیاید. سپس مخلوط مس و نانولوله‌های کربنی، پرس شده و تحت فرایند تف‌جوشی قرار گرفت. فشار هیدرولیک برای پرس کردن ۳۵ تن انتخاب شد. پودرها در قالب (قطر ۳۰ میلی‌متر، طول ۶۰ میلی‌متر) و با استفاده از فشار ۴۰۰ MPa در مدت ۵ دقیقه پرس شدند. به منظور جلوگیری از اصطکاک در طی فرایند پرس کردن میان پانچ و قالب، اسید استئاریک به عنوان عامل روانکار استفاده شد. پرس کردن برای نمونه پودر آلیاژی Cu-5Zn و تمام نانوکامپوزیت‌ها با درصد متفاوت نانولوله‌های کربنی در فشار ۴۰۰ MPa و به مدت ۵ دقیقه انجام شد. زمانی که پرس شدن نمونه‌ها به اتمام رسید قطعات پرس شده و نانوکامپوزیت‌ها طی فرایندی تف‌جوشی شدند. تف‌جوشی در

کوره الکتریکی که شامل لوله آلومینا در اتمسفر کنترل شده آرگون انجام شد. دمای انتخابی تف‌جوشی نمونه‌ها در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ دقیقه انجام شد. به محض اتمام این زمان، نمونه‌ها از کوره خارج شده و تحت آهنگری قرار گرفتند. و فشارتا زمانی که ضخامت نمونه‌ها به ۸ میلی‌متر برسد به طور تدریجی ادامه پیدا کرد.

***آزمون و مشخصات.*** مشخصات نانوکامپوزیت‌ها با درصد وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش‌های مختلفی ارزیابی شدند، از جمله ویژگی‌ها، چگالی و پراکندگی نانولوله‌های کربنی در زمینه نانوکامپوزیت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و خواص مکانیکی آنها مانند میکروسختی به روش ویکرز و استحکام کششی بررسی شد. برای نمونه آلیاژی مس-روی آهنگری شده دو نوع چگالی بررسی شد که عبارتند از چگالی تئوری و تجربی، چگالی تئوری نمونه‌ها با استفاده از چگالی و کسر حجمی انجام شد. چگالی تجربی نمونه‌های نانوکامپوزیت با استفاده از قانون ارشمیدس (ASTM B311 standard) محاسبه شد. به منظور بررسی پراکندگی نانولوله‌های کربنی CNTs در زمینه، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. برای آزمون میکروسختی دیجیتالی دستگاه مدل Make:Everone مورد استفاده قرار گرفت. برای هر نمونه پنج بار آزمون سختی‌سنجی در مکان‌های مختلف انجام شد که میانگین آن گزارش شده است. آزمون کششی نمونه‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه انجام شد.

## نتایج و بحث

***مطالعات میکروساختاری.*** شکل (۱) تصویر SEM از نانولوله‌های کربنی که به شکل خوشه‌ای است نشان داده شده است. شکل خوشه‌های نانولوله‌های کربنی نتیجه ایجاد نیروی واندروالس بین آنها بوده و قطر این خوشه‌ها در محدوده ۵۰-۳۰ نانومتر و طول آنها در حد چند میکرومتر است. به منظور شکستن خوشه‌های نانولوله‌های کربنی و پراکندگی بهتر، به مدت ۳۰ دقیقه در محلول اتانول، تحت فراوری آلتراسونیک قرار گرفت. بعد از این مرحله، خوشه‌های بزرگ نانولوله‌های کربنی شکسته شده و نانولوله‌های کربنی مجزا به وضوح به دست آمد.




شکل ۱ تصویر SEM از نانولوله‌های کربنی

از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مطالعه پراکندگی نانولوله‌های کربنی در زمینه استفاده شد. زیرا تمام خواص نانوکامپوزیت بستگی به پراکندگی و اتصال نانولوله‌های کربن با زمینه دارد. شکل (۲) تصویر SEM با دقت بالا از نانوکامپوزیت با ۰/۲۵٪ وزنی از نانولوله‌های کربن را پس از فرایند تف‌جوشی و آهنگری نشان می‌دهد. پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی در زمینه بدون ایجاد خوشه به وضوح دیده می‌شود. علاوه بر این، پیوند مطلوب نانولوله‌های کربنی با زمینه خوب به نظر می‌رسد. با توجه به تصاویر SEM، فرایند تف‌جوشی و آهنگری در دماهای بالا موجب کاهش میزان تخلخل و بهبود چگالی و پیوند بین نانولوله‌های کربنی و دانه‌های مس و شکستن خوشه‌های بین نانولوله‌های کربنی شده است. در هر حال باز نمی‌توان گفت که ساختار بدون کلوخه‌های نانولوله‌های کربنی می‌باشد. احتمال کلوخه‌ای شدن در نانوذرات به علت نسبت سطح به حجم بالای این مواد خیلی بالا می‌باشد.




شکل ۲ تصویر SEM از Cu-5Zn-0.25%CNTs بعد از تف‌جوشی و آهنگری

عامل مؤثر در خواص مکانیکی و فیزیکی نانوکامپوزیت‌ها پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربن در زمینه می‌باشد. روش ثانویه مانند آهنگری برای تهیه نانوکامپوزیت چگال‌تر بدون هیچ گونه خوشه، در داخل زمینه استفاده شد.

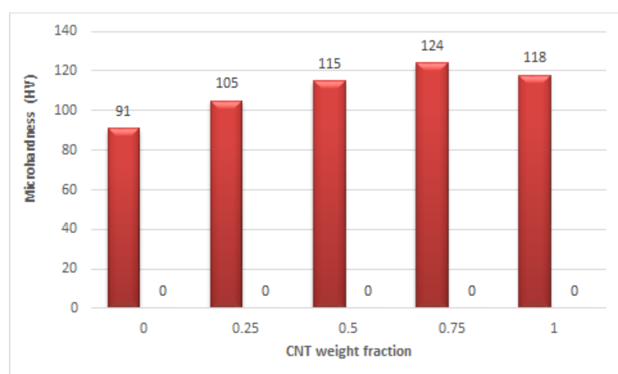
***مطالعات چگالی.*** چگالی تئوری با استفاده از قاعده مخلوط‌ها محاسبه شده و چگالی تجربی با استفاده از قانون ارشمیدس برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. چگالی تئوری برای مس–روی و برای نانولوله‌های کربن مورد استفاده به ترتیب ۸،۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. چگالی تئوری نانوکامپوزیت‌ها با افزایش نانولوله‌های کربنی کاهش یافت. در ضمن چگالی به دست آمده بر اساس قانون ارشمیدس برای هر دو نمونه آلیاژ مس–روی و نانوکامپوزیت‌ها کمتر از مقدار تئوری آن به دست آمده است.

جدول ۱ چگالی آلیاژ پایه مس–روی و نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی

| ترکیبات مورد مطالعه | چگالی تئوری $g/cm^3$ | چگالی محاسبه شده $g/cm^3$ | چگالی نسبی(٪) |
|---|---|---|---|
| Cu-5Zn | ۸/۸۹ | ۸/۷۶ | **۹۸/۵۳** |
| Cu-5Zn -۰/%۲۵CNTs | ۸/۷۹ | ۸/۶۵ | **۹۸/۴۰** |
| Cu-5Zn -۰/%۵CNTs | ۸/۷۲ | ۸/۵۵ | **۹۸/۰۵** |
| Cu-5Zn -۰/%۷۵CNTs | ۸/۶۵ | ۸/۴۷ | **۹۷/۹۲** |
| Cu-5Zn -%۱CNTs | ۸/۵۷ | ۸/۳۵ | **۹۷/۴۳** |

نتایج نشان می‌دهد چگالی تجربی نانو کامپوزیت‌ها با افزایش CNTs در مقایسه با آلیاژ مس–روی بعد از مرحله آهنگری گرم کاهش یافته است. دلیل عمده آن وجود نانولوله‌های کربنی در نانو کامپوزیت‌های مس–روی می‌باشد که به کاهش چگالی کمک می‌کند. به طور کلی، بیشترین مقدار چگالی نسبی برای آلیاژ پایه در مقایسه با نانوکامپوزیت‌ها به دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار چگالی به ترتیب برای آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت با یک درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی به دست آمد. نتیجه به دست آمده حاصل از آهنگری گرم بوده که موجب بسته شدن حفره‌ها و به حداقل رساندن ترک در نانوکامپوزیت‌ها پس از مراحل پرس و تف جوشی بوده است.

***میکرو سختی.*** سختی هر ماده مستقیما به ریزساختار آن وابسته است. در نانوکامپوزیت‌ها، نوع فاز تقویت کننده، پراکندگی، اندازه ذرات و شکل آن بسیار مهم است. قرارگیری نانولوله‌های کربنی در زمینه مس–روی موجب بهبود سختی شده و با افزایش کسر وزنی نانولوله‌های کربنی تا مقدار ۰/۷۵ ٪ در نانوکامپوزیت‌های تهیه شده موجب افزایش خطی سختی شده و میکرو سختی با افزایش مقدار نانولوله‌های کربن از ۰/۷۵ درصد به ۱ درصد کاهش یافته است (شکل ۳). نانو کامپوزیت حاوی ۰/۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربن، دارای بیشترین میکروسختی هستند. دلیل افزایش میکروسختی، وجود نانولوله‌های کربنی سخت در ساختار است که مقاومت در برابر تغییر پلاستیکی را بهبود بخشیده است. به طور کلی وجود فاز تقویت کننده سخت نانولوله‌های کربنی (CNTs) در زمینه نرم و هادی مانند مس–روی می‌تواند به طور قابل توجهی سختی نانوکامپوزیت‌ها را بهبود بخشد [۱۵،۱۶].




شکل ۳ میکروسختی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بر پایه Cu-5Zn

افزایش میزان میکروسختی در نانوکامپوزیت‌های پایه مس–روی با فاز تقویت کننده نانولوله‌های کربنی به دلایل زیر است:

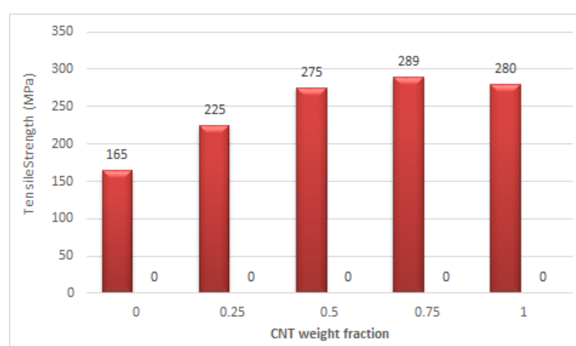
۱. افزودن نانولوله‌های کربنی سفت و سخت به زمینه آلیاژ مس–روی نرم موجب بهبود میکروسختی نانوکامپوزیت‌ها شده است.

۲. اختلاف زیاد در ضرایب انبساط حرارتی زمینه و نانولوله‌های کربنی باعث ایجاد نابه‌جایی در فصل مشترک بین زمینه و فاز تقویت کننده می‌شود. چگالی نابه‌جایی‌ها با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد و به‌عنوان مانعی برای تغییر شکل پلاستیک عمل می‌کند.

۳. عواملی همچون پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی، پیوند مناسب بین زمینه و نانولوله‌های کربنی و اصلاح دانه‌بندی که نتیجه‌ای از فرایند آهنگری گرم است، می‌تواند به طور

چشم‌گیری میکروسختی نانوکامپوزیت‌ها را افزایش دهد.

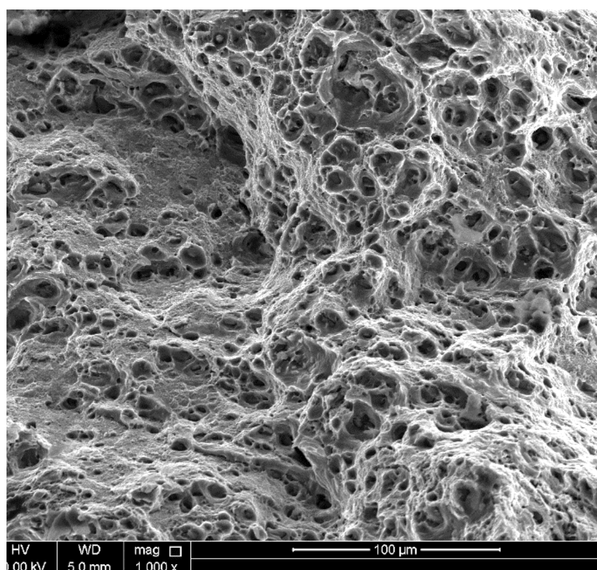
***مطالعات کششی.*** تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیت‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.



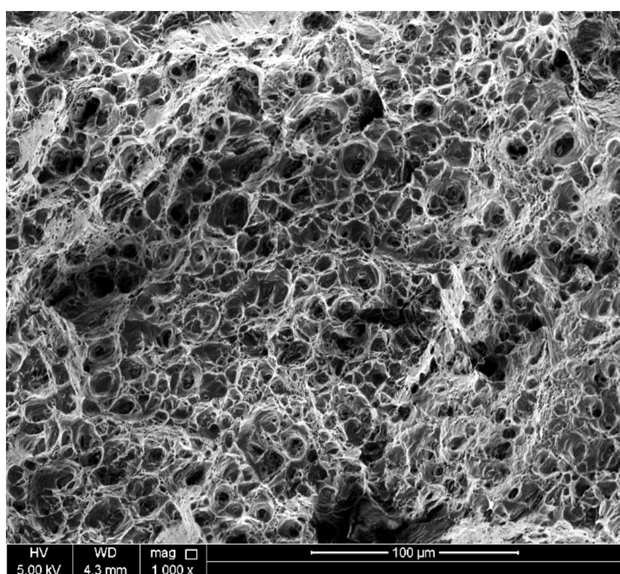

شکل۴ استحکام کششی نانوکامپوزیت پایه مس–روی با فاز تقویت کننده نانولوله–های کربنی

افزایش خطی در مقدار استحکام نانوکامپوزیت‌های مس–روی با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربن تا ۰/۷۵ ٪ دیده شد. برای نانوکامپوزیت حاوی ٪۰/۷۵ نانولوله کربنی بیشترین استحکام کششی در حدود MPa ۲۸۵ و برای آلیاژ پایه مس–روی MPa ۱۶۵ به دست آمد. استحکام نانوکامپوزیت به دلیل ایجاد فصل مشترک بین زمینه و نانولوله کربنی و به‌وجود آمدن نابه‌جایی‌ها افزایش پیدا می‌کند. و به احتمال زیاد مکانیزم پل‌زنی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های افزایش استحکام در نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی می‌باشد. در این پژوهش فرایند آهنگری موجب شکستن نانولوله‌های کربنی و پراکندگی یکنواخت آن در زمینه شده است. در بسیاری از تحقیقات اثرات مثبت آهنگری گرم روی پراکندگی یکنواخت فاز تقویت کننده (نانولوله‌های کربنی) بر روی نانوکامپوزیت‌ها گزارش شده است [۲۸،۲۷]. در این مورد به علت عدم انطباق بین زمینه و نانولوله‌های کربنی، نابه‌جایی ایجاد می‌شود و چگالی نابه‌جایی‌ها در ساختار افزایش می‌یابد. با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در نانوکامپوزیت، دانسیته نابه‌جایی‌های ایجاد شده نیز افزایش یافته است. بنابراین با افزایش میزان نانولوله‌های کربنی در زمینه، حرکت نابه‌جایی‌ها متوقف شده و یا مجبور به خمش بین آنها می‌شود. در نتیجه با مکانیزم افزایش جنگل نابه‌جایی‌ها و پل‌زنی نانولوله‌های کربنی در ناحیه ترک باعث افزایش استحکام در نانوکامپوزیت می‌شود.

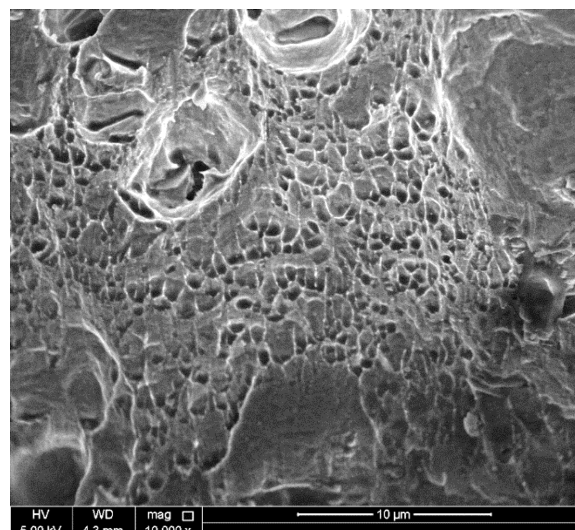
***بررسی سطح شکست.*** یکی از راه‌های درک بهتر مکانیزم‌های حاکم بر استحکام‌دهی نانوکامپوزیت‌ها بررسی سطح شکست نمونه‌های نانوکامپوزیت می‌باشد. در شکل (۵) و شکل (۶)، سطح شکست آلیاژ پایه مس–روی و نانوکامپوزیت CNTs%75/0-Cu-5Zn به ترتیب نشان داده شده است.



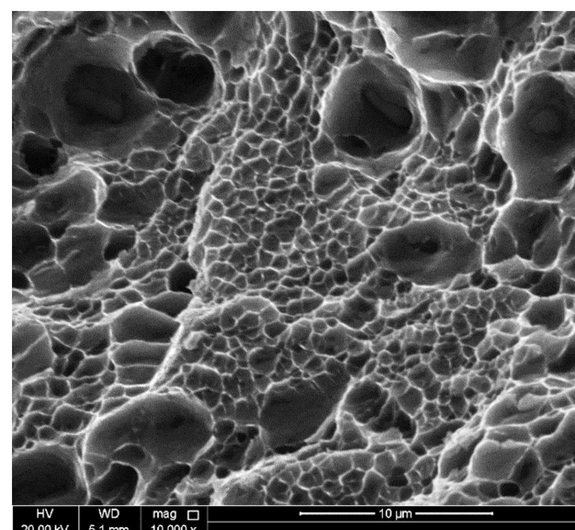

شکل ۵ تصویر SEM از سطح شکست آلیاژ پایه مس–روی پس از آزمون کشش




شکل ۶ تصویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت ۰/٪۷۵CNTs–Cu-5Zn بعد از آزمون کشش




شکل ۷ تصویر SEM از سطح شکست آلیاژ پایه مس-روی پس از آزمون کشش با بزرگ‌نمایی بالا




**شکل ۸** تصویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت CNTs%75/0-Cu-5Zn بعد از آزمون کشش با بزرگ‌نمایی بالا

شکل (۷) و (۸) به ترتیب سطح شکست آلیاژ پایه مس-روی و نانوکامپوزیت CNTs%75/0-Cu-5Zn را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، وجود لبه و برآمدگی‌ها که نوعی از شکست داکتیل است نشان داده شده است. علاوه بر این، برآمدگی‌های بزرگ‌تر و عمیق‌تر در آلیاژ پایه مس-روی نسبت به نانوکامپوزیت CNTs%75/0-Cu-5Zn دیده شد. مشاهدات نشان می‌دهد که شکست نانوکامپوزیت‌ها عمدتا به دلیل ترک ایجاد شده در فصل مشترک نانولوله‌های کربنی و زمینه می‌باشد و احتمال شکسته شدن نانولوله‌های کربنی به دلیل تنش‌های موضعی در اطراف آنها بسیار زیاد است. به واسطه چنین تنش‌های زیادی که قبل از ترک ایجاد شده، حفره‌ها بین نانولوله‌های کربنی آسیب دیده رشد نموده که منجر به پدیده جوانه‌زنی ترک، رشد ترک و در نهایت شکست نمونه شده است.

## نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- نمونه‌های نانوکامپوزیت با زمینه آلیاژ Cu-5Zn و تقویت کننده نانولوله‌های کربنی با استفاده ازروش متالورژی پودر که شامل استفاده از امواج آلتراسونیک، آسیای گلوله‌ای و فرایند آهنگری گرم است تهیه شده‌اند.

۲- میزان تخلخل در نانو کامپوزیت‌ها بعد از مرحله آهنگری به حداقل رسیده و مطالعات ساختاری توسط SEM پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی را در زمینه نشان داد.

۳- براساس نتایج به دست آمده، نانوکامپوزیت‌های تهیه شده با تقویت کننده نانولوله‌های کربنی، دارای چگالی مناسب ونزدیک به چگالی تئوری است.

۴- میکروسختی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش نانولوله‌های کربنی تا میزان ٪ ۰/۷۵، به صورت خطی افزایش یافته و میزان افزایش سختی نانوکامپوزیت با فاز تقویت کننده نانولوله کربنی، ٪۳۶٫۲۶ بیشتر از آلیاژ پایه مس-روی به دست آمده است.

۵- استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های مس با افزایش میزان تقویت کننده نانولوله‌های کربنی تا مقدار ٪ ۰/۷۵، ۲۸۹ MPa به دست آمده که در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی با استحکام ۱۶۵ MPa افزایش چشم‌گیری داشته است.

## تقدیر و تشکر

## مراجع

[1] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P. V. Braun, “Nanocomposite Science and Technology,” WILEY- VCH GmbH & Co.

KGaA, *Weinheimpp*. 12-18, (2006).

[2] M. Dinulović, B. Rašuo,"Dielectric properties modeling of composite materials", *FME Transactions*, vol. 37, no 3, pp.113-118, (2009).

[3] M. Dinulović, B. Rašuo, "Dielectric modeling of multiphase composites", *Composite Structures*, vol. 93, no. 12, pp. 3209- 3215, (2011).

[4] R. George, K. T. Kashyap, R. Rahul, S. Dilip, "Synthesis and characterization of carbon nanotubes by arc discharge method," *J. Inst. Eng. India*, vol. 88, pp. 23.26, (2007).

[5]C. G. Kaufmann, R. Y. S. Zampiva, C. P. Bergmann, A. K. Alves, S. R. Mortari, A. Pavlovic, "Production of multi-wall carbon nanotubes starting from a commercial graphite pencil using an electric arc discharge in aqueous medium," *FME Transactions*, vol. 46, pp. 151-156, (2018).

[6] P. J. F. Harris, "Carbon nanotube science," Cambridge University Press, New York, (2009).

[7] P. W. R. Beaumont, C. Soutis and A. Hodzic, "Structural integrity and durability of advanced composites: Innovative modelling methods and intelligent design," *Elsevier, Cambridge*, UK, (2015).

[8]G. Overney, W. Zhong, D. Tomanek, "Structural rigidity and low-frequency vibrational-modes of long carbon tubules," Z. Phys. D: At., Mol. Clusters, vol. 27, pp. 93-96, (1993).

[9] J. P. Lu, "Elastic properties of nanotubes and nanoropes, Phys," Rev. Lett., vol. 79, pp. 1297- 1300,(1997).

[10]M. M. J. Treacy, T. W. Ebbesen, J. M. Gibson, "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes," *Nature*, vol. 381, pp. 678-680, (1996).

[11] P. G. Koppad, V. K. Singh, C. S. Ramesh, R. G. Koppad, K. T. Kashyap, "Metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes," In: Tiwari, A., Shukla, S.K. (Eds.): Advanced Carbon Materials and Technology, John Wiley & Sons, Inc., *Hoboken*, pp. 331-376, (2013).

[12] G. Qianming, L. Dan, L. Zhi, Y. Xiao-Su, L. Ji, "Tribology properties of carbon nanotube-reinforced composites," In: Friedrick, K., Schlarb, A.K. (Eds.): *Tribology and Interface Engineering Series*, vol. 55, pp. 245-267, (2008).

[13] H. M. Mallikarjuna, C. S. Ramesh, P. G. Koppad, R. Keshavamurthy, K. T. Kashyap, "Effect of carbon nanotube and silicon carbide on microstructure and dry sliding wear behavior of copper hybrid nanocomposites," *Trans. Nonferrous Met. Soc.* Vol. 26, pp. 3170-3182, (2016).

[14] H. M. Mallikarjuna, K. T. Kashyap, P. G. Koppad, C. S. Ramesh, R. Keshavamurthy, "Microstructure and dry sliding wear behavior of Cu-Sn alloy reinforced with multiwalled carbon nanotubes," *Trans. Nonferrous Met. Soc.*, Vol. 26, pp. 1755-1764, (2016).

[15] P. G. Koppad, K. T. Kashyap, V. Shrathinth, T. A. Shetty, R. G. Koppad, "Microstructure and microhardness of carbon nanotube reinforced copper nanocomposites," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 605-609, (2013).

[16] P. G. Koppad, H. R. Aniruddha Ram, K. T. Kashyap, "On shear-lag and thermal mismatch model in multiwalled carbon nanotube/copper matrix nanocomposites," *J. Alloys Compd.*, vol. 549, pp. 82-87, (2013).

[17] P. G. Koppad, H. R. A. Ram, C. S. Ramesh, K. T. Kashyap, R. G. Koppad, "On thermal and electrical properties of multiwalled carbon nanotubes/copper matrix nanocomposites," *J. Alloys Compd.*, Vol. 580, pp. 527-532,(2013).

[18] R. George, K. T. Kashyap, R. Rahul, S. Yamdagni, “Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites,” *Scr. Mater.* 53, pp. 1159- 1163, (2005).

[19] H. R. A. Ram, P. G. Koppad, K. T. Kashyap, “Nanoindentation studies on MWCNT/aluminum alloy 6061 nanocomposites,” *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 559, pp. 920-923, (2013).

[20] K. T. Kashyap, K. B. Puneeth, A. Ram, P. G. Koppad, “Ageing kinetics in Carbon nanotube reinforced Aluminium alloy AA6063,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 710, pp. 780-785, (2012).

[21] J. P. Tu, Y. Z. Yang, L. Y. Wang, X. C. Ma, X. B. Zhang, “ Tribological properties of carbon-nanotube- reinforced copper composites,” *Tribol. Lett*., vol. 10 pp. 225-228, (2001).

[22] K. T. Kim, S. I. Cha, S. H. Hong, S. H. Hong, “Microstructures and tensile behavior of carbon nanotubes reinforced Cu matrix nanocomposites,” *Mater. Sci. Eng*. A, vol. 430, pp. 27-33, (2006).

[23] Y. A. Sorkhe, H. Aghajani & A. Taghisadeh Tabrizi, “Synthesis and characterisation of Cu–TiO2 nanocomposite produced by thermochemical process, Powder Metallurgy,” *Powder Metallurgy*, pp. 107-111, (2016).

[24] G. Naseri Azari Golnaz, A. Taghizadeh Tabrizi, H. Aghajani, “Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO2 nanocomposite synthesized by the use of SHS method,” Journal of Materials Research and Technology, vol 8, no. 2, pp. 2216-2222, (2019)

[25] S. A. N. Mehrabani, A. T. Tabrizi,, H. Aghajani, H. Pourbagheri, “Corrosion Behavior of SHS-Produced Cu–Ti–B Composites,” *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, Vol. 29, No. 3, pp. 167–172, (2020).

[26] H. Aghajani, M. Roostaei, S. Sharif Javaherian, A. Taghizadeh Tabrizi, A. Abdoli Silabi, N. Farzam Mehr, “Wear behavior of self-propagating high-temperature synthesized Cu-TiO2 nanocomposites”, *Synthesis and Sintering*, vol.1, no. 3, pp.127-134, (2021).

[27] K. V. Shivananda Murthy, D. P. Girish, R. Keshavamurthy, T. Varol, P. G. Koppad, “Mechanical and thermal properties of AA7075/TiO2/Fly ash hybrid composites obtained by hot forging,” *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int*., vol. 27, pp. 474-481, (2017).

[28] G. S. Pradeep Kumar, P. G. Koppad, R. Keshavamurthy, M. Alipour, “Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061–TiC metal matrix composites,” *Arch. Civ Mech. Eng.*, Vol. 17, pp. 535-544, (2017).